



Пространственные распределения аэрозоля в тропосфере по данным проекта DELICAT

Мамонтов А.Е. (alex1372049@gmail.com), Федорова О.В., Горбунов М.Е.

Институт физики атмосферы им. Обухова РАН, Москва, Россия

Ключевые слова: Лидар, дистанционное зондирование, пространственные спектры, флуктуации аэрозоля, рассеяние, турбулентность.

Аннотация

В 2009–2015 г. выполнялся проект DELICAT (DEmonstration of Lidar based Clear Air Turbulence detection, Демонстрация обнаружения турбулентности ясного неба (ТЯН) при помощи лидара), с участием ИФА РАН. Для обнаружения ТЯН впереди по курсу самолета на расстояниях до 30 км в режиме реального времени предполагалось использовать бортовой лидар. Флуктуации интенсивности излучения, рассеянного аэрозолем, являются основной помехой.

Мы анализируем пространственные спектры флуктуаций плотности аэрозоля. Для анализа выбирались отрезки полета с постоянными высотой, направлением и скоростью самолета. Сигнал рассматривается в двух координатах: расстояние от самолета до рассеивающего объема и путь самолета относительно воздушной массы.

Был предложен новый метод обработки сигнала, основанный на 2-мерном преобразовании Фурье, позволяющий идентифицировать облака аэрозоля. При этом делаются следующие приближения: 1) неподвижные облака, 2) малые вариации направления линии зондирования. Во введенных выше координатах облака аэрозоля проявляются в виде полос, наклоненных под углом 45 градусов. Вычислялись двумерные Фурье-спектры сигнала для выбранных зон полетов: а) без аэрозоля, что позволяет оценить уровень шумов; б) с облаками аэрозоля. Спектры для зон, где наблюдается аэрозоль, сосредоточены в окрестности главной диагонали частотной плоскости. Полезный сигнал представляет собой плоскую волну в направлении диагонали, и, следовательно, разрешение такого сигнала по гармоническим волнам будет содержать только гармонические волны вдоль диагонали. Это позволяет отфильтровать шум. Диагональные сечения полученных спектров равны одномерным пространственным спектрам флуктуаций аэрозоля. Спектры подчиняются степенному закону с показателем от 2 до 2.5.

Целью проекта являлась разработка бортового лидара для обнаружения ТЯН впереди по курсу самолета на расстояниях до 30 км в режиме реального времени. Флуктуации интенсивности рассеянного излучения, вызванные аэрозолем, являются основной помехой при зондировании турбулентности. Обсуждались четыре типа лидара для решения данной задачи:

1. Импульсный когерентный доплеровский лидар. Прибор зондирует скорость ветра, определяя сдвиг частоты при рассеянии на частицах пыли в воздухе. Время распространения рассеянного сигнала определяет пространственную привязку измерений скорости ветра. Низкое пространственное разрешение при этом снижает точность измерений. Улучшение разрешения возможно лишь за счет укорачивания зондирующих импульсов, но в этом случае снижается их энергия и возрастает уровень шума.

2. Лидар с фильтром рассеяния Ми/Рэлея. Фильтр использует тот факт, что спектр рассеяния Ми существенно уже, чем рэлеевский спектр, поскольку флуктуации скорости тяжелых аэрозольных частиц (капли воды, пыль и т.д.) существенно меньше, чем у молекул. Индикатором турбулентности служат возмущения интенсивности рассеянного сигнала. Реализация такого прибора изначально планировалась в проекте DELICAT, но не была осуществлена.

3. Лидар усиления обратного рассеяния (YOP). Эффект усиления обратного рассеяния (YOP), открытый теоретически в 1972 г., возникает в случайной неоднородной среде, когда прямая и рассеянная волны распространяются через одни и те же неоднородности. Благодаря принципу взаимности геометрической оптики флуктуации интенсивности прямой волны в атмосфере коррелируют с флуктуациями интенсивности рассеянной волны в точке расположения источника. В результате среднее значение интенсивности пришедшего излучения увеличивается пропорционально интенсивности турбулентности.

4. Лидар, измеряющий рассеянное излучение в двух поляризациях. Аэрозоль может быть обнаружен по деполаризованному сигналу в кросс-поляризации. Недостаток этого метода в том, что не все виды аэрозоля приводят к деполаризации. В проекте был реализован лидар с двумя поляризациями.

Проект DELICAT



DELICAT – DEmonstration of LIdar based Clear Air Turbulence detection (Fenevrou et al. 2009) нацелен на решение одной из задач авиационной безопасности – заблаговременного обнаружения впереди по курсу самолета области турбулентности ясного неба. Выполнение проекта началось в 2009 году, непосредственно летные испытания проводились летом 2013. Это европейский международный проект, основные участники которого перечислены ниже:

•Thales Avionics – международная промышленная группа, выпускающая информационные системы для авиакосмического, военного и морского применения;
•Laser Diagnostic Instruments, Эстония;
•METEO FRANCE
Toujours un temps d'avance

•Варшавский университет, Польша;

•EADS – Innovation Works, Германия.

CNRS – Centre national de la recherche scientifique, Франция;

•DLR – German Aerospace Center, Германия;

•Hovemere, Великобритания;

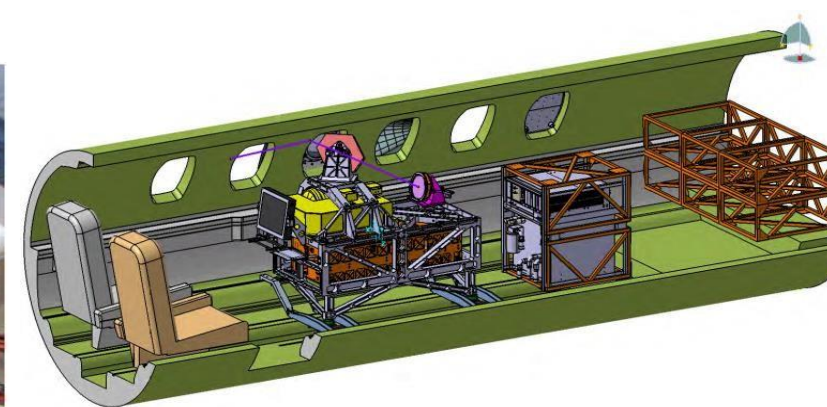
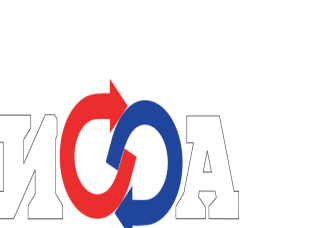
•Meteo France, Франция;

•NLR – Netherlands Aerospace Centre, Нидерланды;

•ONERA – Office National d'Etudes et de Recherches Aerospatiales, Франция;

•INOE 2000 – National Institute for Research and Development in Optoelectronic, Румыния;

•ИФА им. А.М. Обухова РАН, Россия (рук. М.Е. Горбунов);



Самолет Cessna-citation-2: сверху слева – общий вид, сверху в центре – борт с выступающим окном, пропускающим ультрафиолетовое излучение, справа – носовая штанга с дополнительным оборудованием.

Основные характеристики лидара:

длина волны 355 нм,

длительность импульса 7 нс, частота импульсов 100 Гц, угловая расходимость пучка 0.2 мрад,

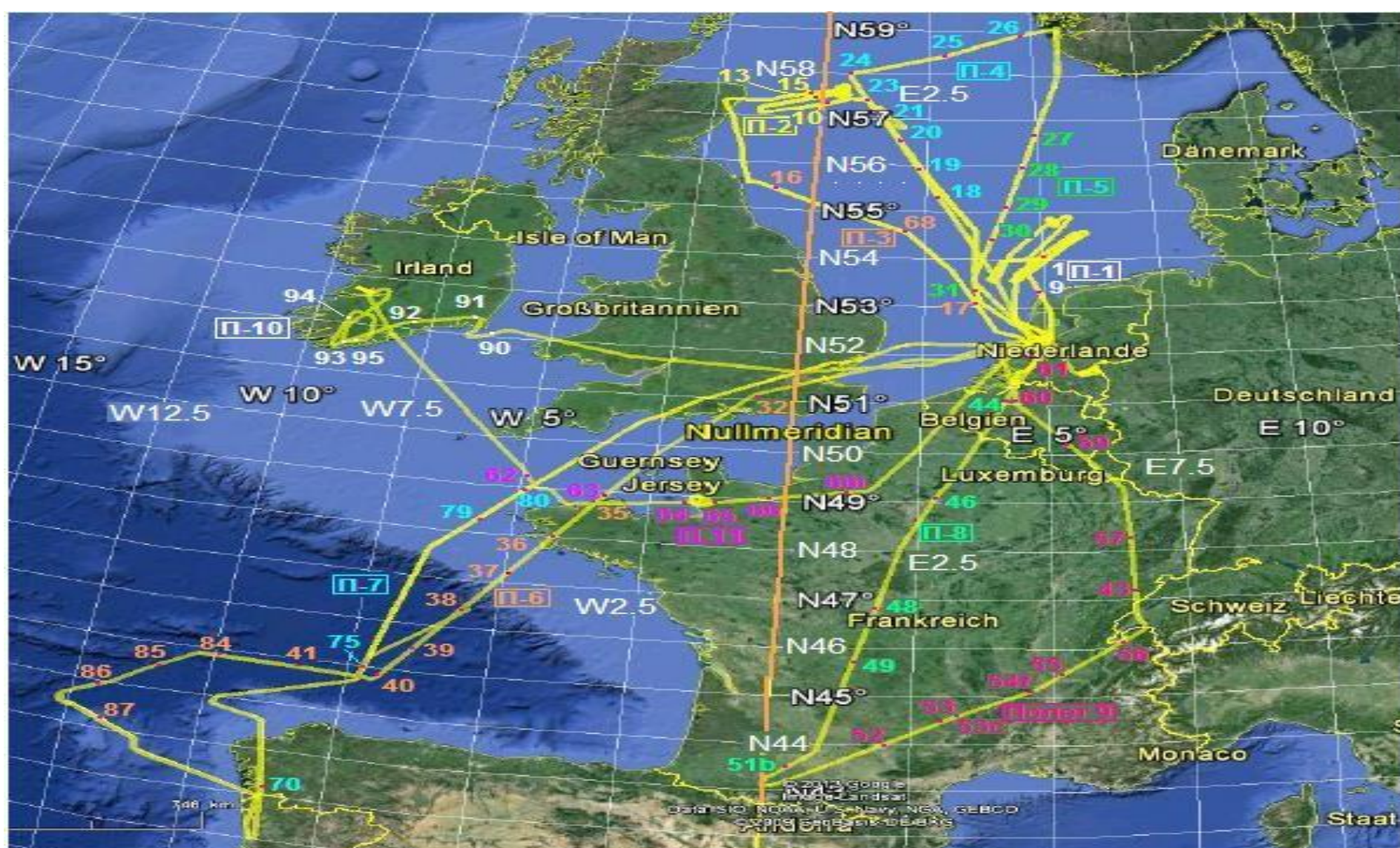
диаметр приемника 14 см,

2 приемных канала: ко- и кросс-поляризация

Минимальное расстояние 1.5 км, максимальное расстояние 15 км, что соответствует 1 – 1.5 мин полета;

Разрешение по расстоянию 5 м;

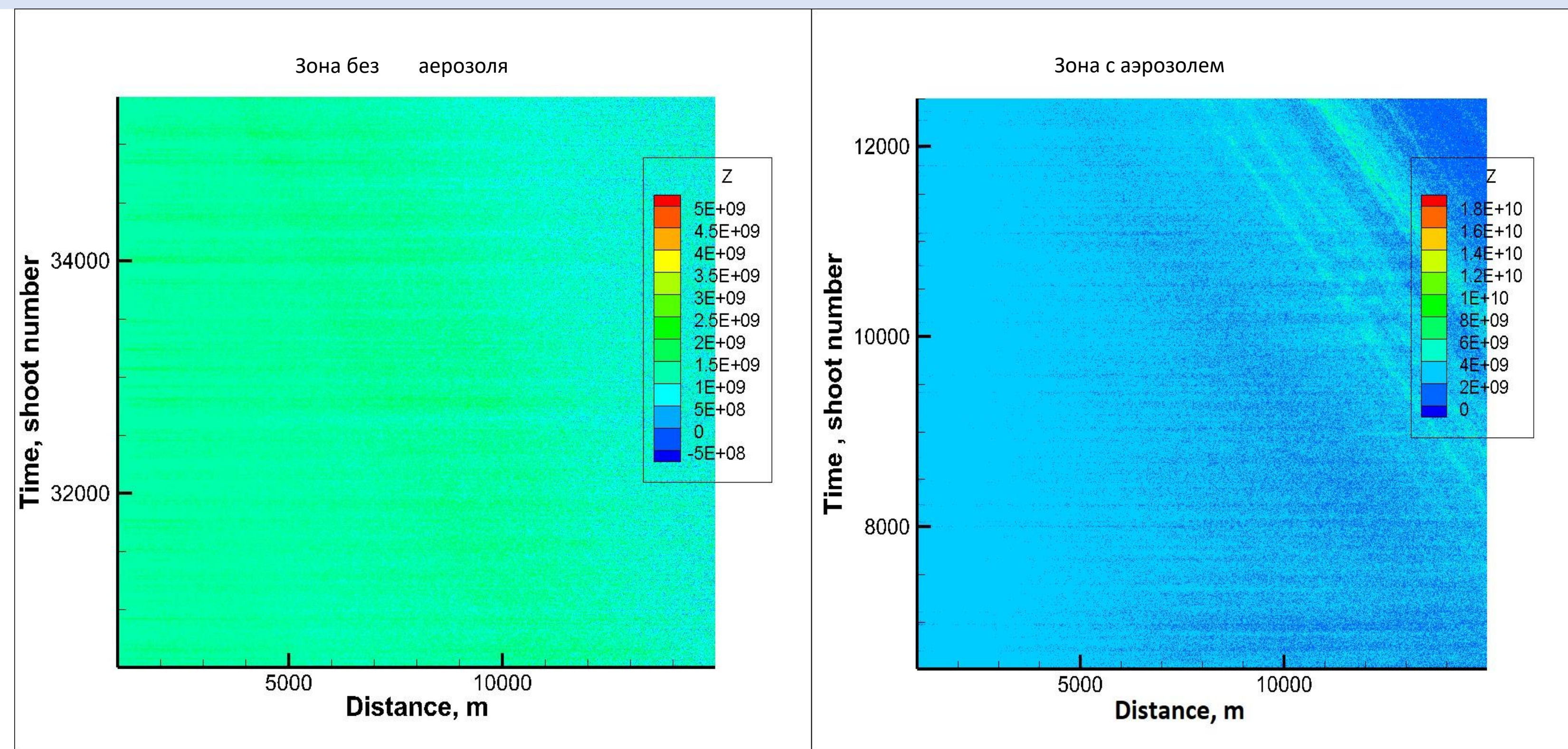
География полетов



Аэропорт базирования
- Скинхолл,
Амстердам

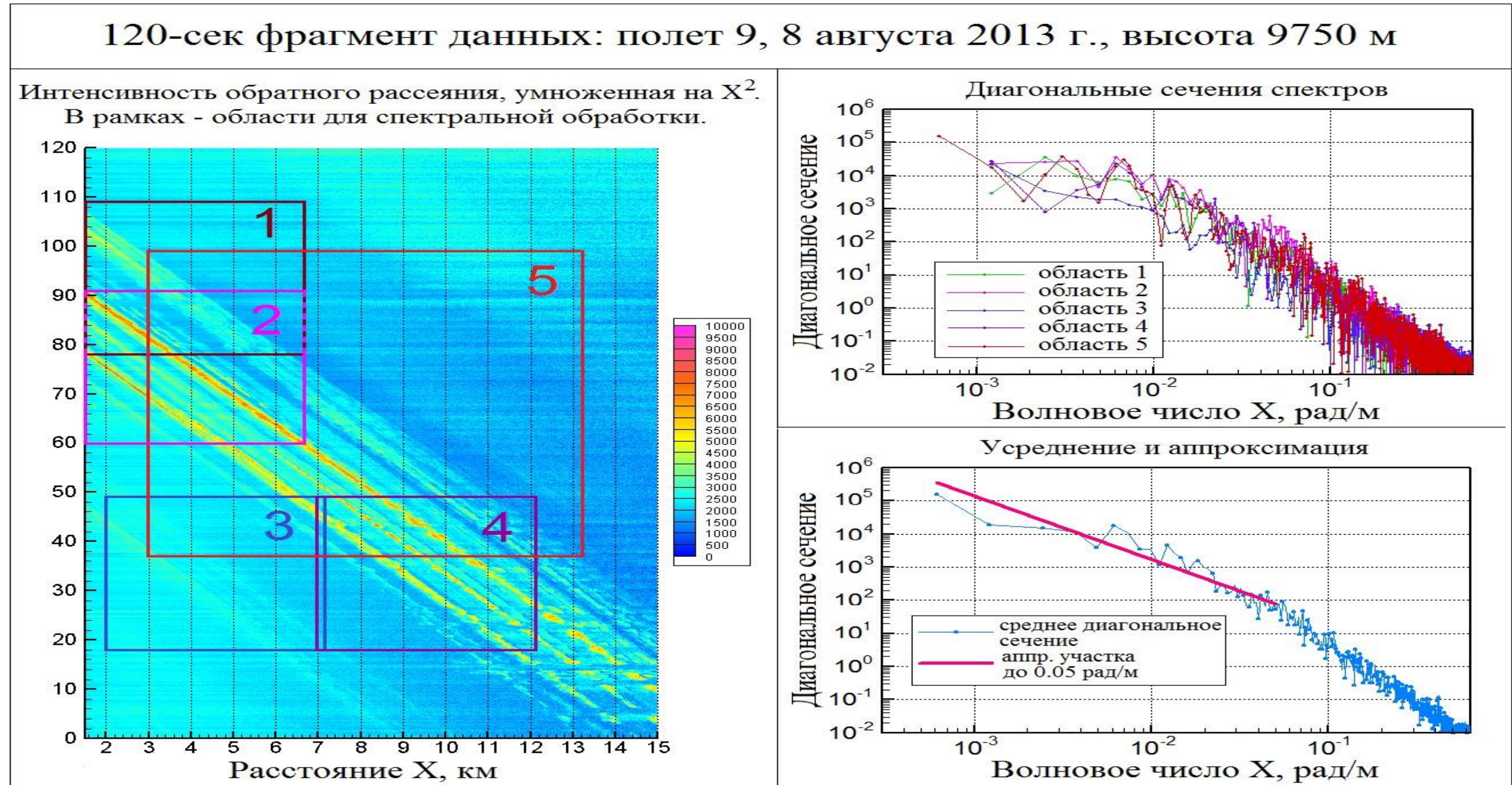
Полет 1: 17.07.13
(тренировочный)
Полет 2: 26.07.13
Полет 3: 26.07.13
Полет 4: 31.07.13
Полет 5: 31.07.13
Полет 6: 06.08.13
Полет 7: 07.08.13
Полет 8: 08.08.13
Полет 9: 08.08.13
Полет 10: 12.08.13
Полет 11: 12.08.13

Выборка зон для спектров



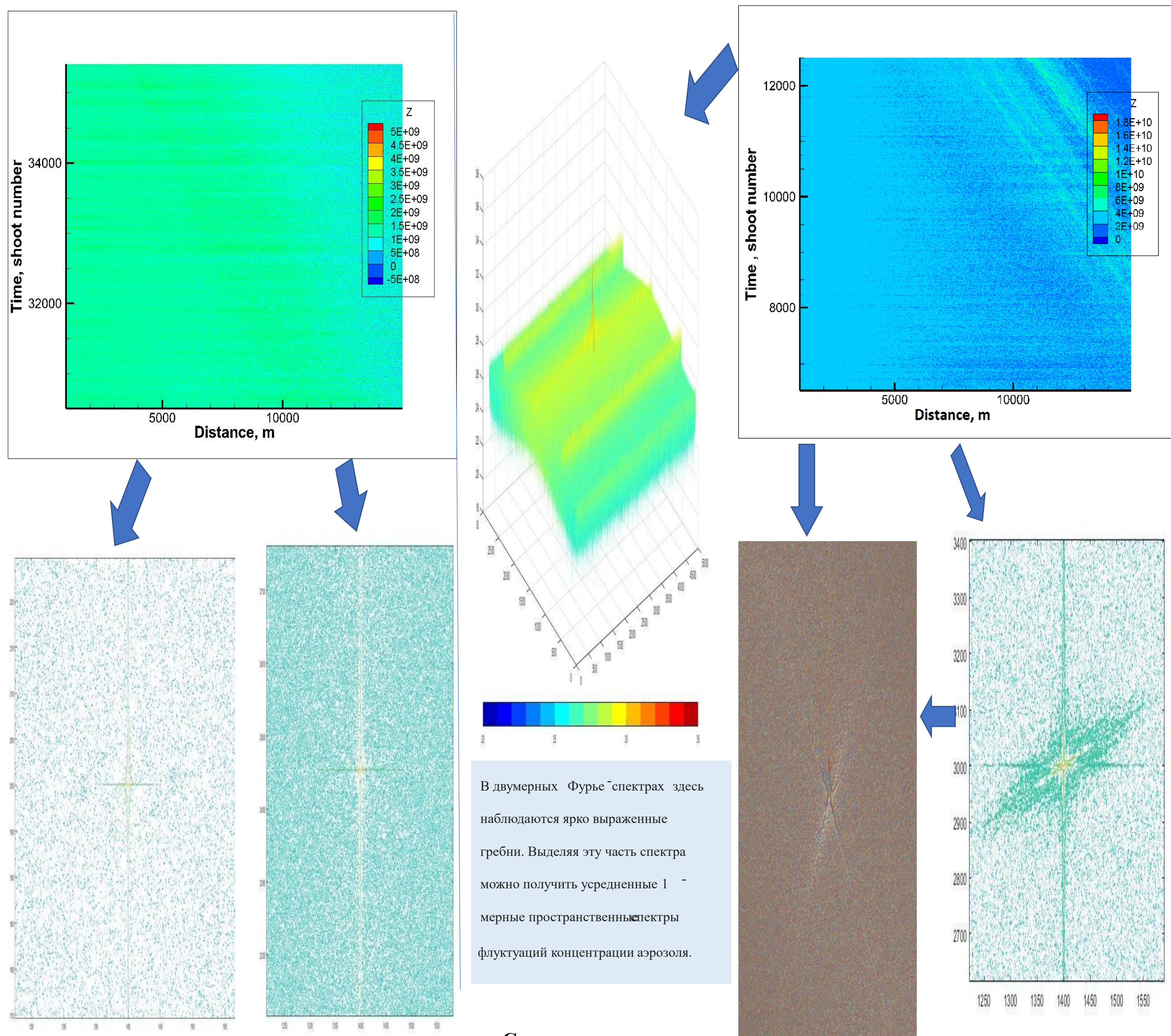
Зоны, где аэрозоль отсутствовал, позволяют оценить уровень шумов. Для зон, в которых присутствуют облака аэрозоля на полученных графиках можно увидеть четкие наклонные полосы.

Получение одномерных спектров



Спектральный анализ выбранных зон

с помощью FFT2



Список литературы

1. Yorks, J.E.; Hlavka, D.L.; Vaughan, M.A.; McGill, M.J.; Hart, W.D.; Rodier, S.; Kuehn, R. Airborne validation of cirrus cloud properties derived from CALIPSO lidar measurements: Spatial properties. J. Geophys. Res. Atmos. 2011, 116.
2. Aschmann, A. and Bosenberg, J. Correction scheme for spectral broadening by Rayleigh scattering in differential absorption lidar measurements of water vapor in the troposphere, Appl. Optics, 26, 3026–3032, 1987.
3. J. Kar, M.A. Vaughan, Z. Liu, A.H. Omar, C.R. Trepte, J. Tackett, T.D. Fairlie, R. Kovach. Detection of pollution outflow from Mexico City using CALIPSO lidar measurements. Remote Sensing of Environment Vol.169, November 2015, Pages 205–211. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2015.08.009>
4. Veerman H.P.J., Vrancken P., Lombard L. Flight testing DELICAT – A promise for medium-range clear air turbulence protection // European 46th SETP and 25th SFTF Symposium 2014, 15–18 June, 2014, Luleå, Sweden. URL: <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01111380>.
5. Vrancken P., Wirth M., Ehret G., Barny H., Rondeau P., Veerman H. Airborne forward-pointing UV Rayleigh lidar for remote clear air turbulence detection: system design and performance // Appl. Optics. 2016, V. 55. No. 32. P. 9314–9328. <http://dx.doi.org/10.1364/AO.55.009314>
6. European Community's Seventh Framework Program (FP7/2007-2013) under grant agreement № 233801.
7. J.Kopeck, P.Vrancken. DELICAT Demonstration of Lidar-Based CAT Clear Air Turbulence detection. http://elib.dlr.de/87930/1/DELICAT-RoyMetSoc_20140115_DLR-ICM_p.pdf
8. Виноградов А.Г., Гурвич А.С., Кашкаров С.С., Кравцов Ю.А., Татарский В.И. «Закономерность усиления обратного рассеяния в воздухе. Свидетельство на открытие № 359. Приоритет открытия: 25 августа 1972 г. в части теоретического обоснования и 12 августа 1976 г. в части экспериментального доказательства закономерности. Государственный реестр открытий СССР // Бюлл. изобретений. 1989. № 21.
9. Гурвич А.С. Лидарное зондирование турбулентности на основе усиления обратного рассеяния // Изв. РАН.// Физика атмосферы и океана. 2012. Т. 48, № 6. С. 655–665.
10. Виноградов А.Г., Кравцов Ю.А., Татарский В.И. Эффект усиления обратного рассеяния на телах, помещенных в среду со случайными неоднородностями // Изв. вузов. Радиофиз. 1973. Т. 16, № 7. С. 1064–1070.
11. Банах А.В., Раженков И.А. Лидарные измерения усиления обратного рассеяния // Опт. и спектроскоп. 2016. Т. 120, № 2. С. 339–348.
12. Раженков И.А. Перспективы применения турбулентного YOP-лидара для исследования пограничного слоя атмосферы // Опт. атмосферы и океана 2021. Т. 34, № 1. С. 26–35.
13. Воробьев В.В., Виноградов А.Г. Влияние фоновой турбулентности в лидарных исследованиях турбулентности ясного неба. Оптика атмосферы и океана. 2013, т. 26, № 12, с. 1015–1022.
14. Федорова О.В., Ковал О.А., Мамонтов А.Е. Лидарные наблюдения строения и эволюции скоплений аэрозоля в проекте DELICAT. Турбулентность, динамика атмосферы и климата: сборник трудов / под ред. Г.С. Погодина, И.И. Мокеева, С.Н. Куликова, И.А. Репиной, О.П. Чистяковой, М.А. Фоминкина. 2018. — 387 с. ISBN 978-5-89155-312-5, с. 574–582.
15. Fedorova O.V., Kovalev O.A., Mamontov A.E. Lidar observations of the structure and evolution of aerosol clusters in the DELICAT project. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2019, V. 231, 012016. doi:10.1088/1755-1315/231/1/012016.